

Моделирование гликемического профиля и гликемической кривой больных ИЗСД (или размышления очередного дилетанта)

Данная работа выполнена под впечатлением от идей и обсуждений близких тем активными участниками форума на сайте Dia-Club

Vlad, Москва, 19.02.2007

Введение

Одной из основных задач больного ИЗСД является поддержание сахара крови в определенных интервалах, желательно близких к интервалам здорового человека. Задача эта непростая, так как на содержание сахара влияет много факторов, причем разнонаправленно. Многие из них известны и широко используются при учете влияния на сахарную кривую. Другие используются в меньшей степени. Однако все использование происходит, в основном, на качественном уровне. До количественного использования редко где доходит. Мне, по крайней мере, известно несколько подходов для количественного учета влияния химического состава продуктов и выбранной компенсационной дозы инсулина на сахар крови. Один из них реализован Юрием Кадомским в виде компьютерной программы Диабет2000, а затем Диабет2006. На основе этого подхода продолжают работы по модернизации существующей программы как самим Кадомским, так и его единомышленниками, к которым я и себя отношу.

Вот и меня не обошел соблазн формализовать (перевести на математические формулы) процессы, определяющие гликемию крови ИЗСД больного. Что из этого вышло - смотрите ниже.

1. Математическая модель гликемического профиля и гликемической кривой

Скорость изменения концентрации сахара в крови больного ИЗСД $\frac{d}{dt} C_k(t)$ в любой момент времени t можно представить в первом приближении как:

$$\frac{d}{dt} C_k(t) = \sum_{i=1}^n \frac{d}{dt} C1_i(t) - \sum_{j=1}^m \frac{d}{dt} C2_j(t) \quad (1)$$

где $\frac{d}{dt} C1_i(t) = f1_i(t)$ - скорость поступления сахаров в кровь человека из i источника в момент времени t ;

$\frac{d}{dt} C2_j(t) = f2_j(t)$ - скорость утилизации сахаров из крови за счет J стока в момент времени t ;

$C1_i(t)$ - концентрация поступившего сахара от i источника в момент времени t ;

$C2_j(t)$ - концентрация утилизированного сахара от J стока в момент времени t ;

$C_k(t)$ - суммарная концентрация сахаров в крови в момент времени t ;

n - количество источников;

m - количество стоков.

Концентрацию сахара в крови \tilde{N}_k в любой момент времени t_k можно

определить как:

$$C_k(t_k) = C_0 + \int_{t_0}^{t_k} \left[\sum_{i=1}^n f1_i(t) - \sum_{j=1}^m f2_j(t) \right] dt = C_0 + \sum_{i=1}^n \int_{t_0}^{t_k} f1_i(t) dt - \sum_{j=1}^m \int_{t_0}^{t_k} f2_j(t) dt \quad (2)$$

где \tilde{N}_0 - начальный уровень сахара, или уровень сахара в крови в начальный момент времени t_0 .

Зависимость $\frac{d}{dt} C_k(t_k)$ от t_k , описываемую выражением (1) назовем **гликемическим профилем**, он является дифференциальной характеристикой, а зависимость $C_k(t_k)$ от t_k , описываемую выражением (2) назовем **гликемической кривой**, она является интегральной характеристикой. Соответственно, для каждого источника или стока будем иметь дифференциальную характеристику - гликемический профиль и интегральную - гликемическую кривую.

Моделирование гликемического профиля по формуле (1) или гликемической кривой по выражению (2) возможно при знании закономерностей основных процессов, влияющих на концентрацию сахара в крови. Перейдем к выявлению этих закономерностей и возможностей моделирования.

2. Моделирование постпрандиального гликемического профиля и постпрандиальной гликемической кривой

Основным источником поступления сахаров в кровь является пища. Для моделирования скорости поступления сахаров в кровь после приема пищи или **постпрандиального гликемического профиля** воспользуемся часто используемой в фармакокинетике кривой логнормального распределения вида:

$$\frac{d}{dt} C1_1(t) = f1_1(t) = \frac{a_1 \cdot \exp\left\{-\left[b_1 \cdot (\ln(t) - c_1)\right]^2\right\}}{t} \quad (3)$$

где t время,

a_1 , b_1 и c_1 - коэффициенты, которые определяются индивидуально для каждого вида пищи или продукта.

Постпрандиальную гликемическую кривую получаем после интегрирования выражения (3):

$$\begin{aligned} C1_1(t_k) &= \int_{t_0}^{t_k} f1_1(t) dt = \int_{t_0}^{t_k} \frac{a_1 \cdot \exp\left\{-\left[b_1 \cdot (\ln(t) - c_1)\right]^2\right\}}{t} dt = \\ &= a_1 \cdot \sqrt{\pi} \cdot \frac{\operatorname{erf}\left\{b_1 \cdot [\ln(t_k) - c_1]\right\} + \operatorname{erf}\left\{b_1 \cdot [c_1 - \ln(t_0)]\right\}}{2 \cdot b_1} \end{aligned} \quad (4)$$

Вид полученных кривых в качестве примера приведен на рис. 1.

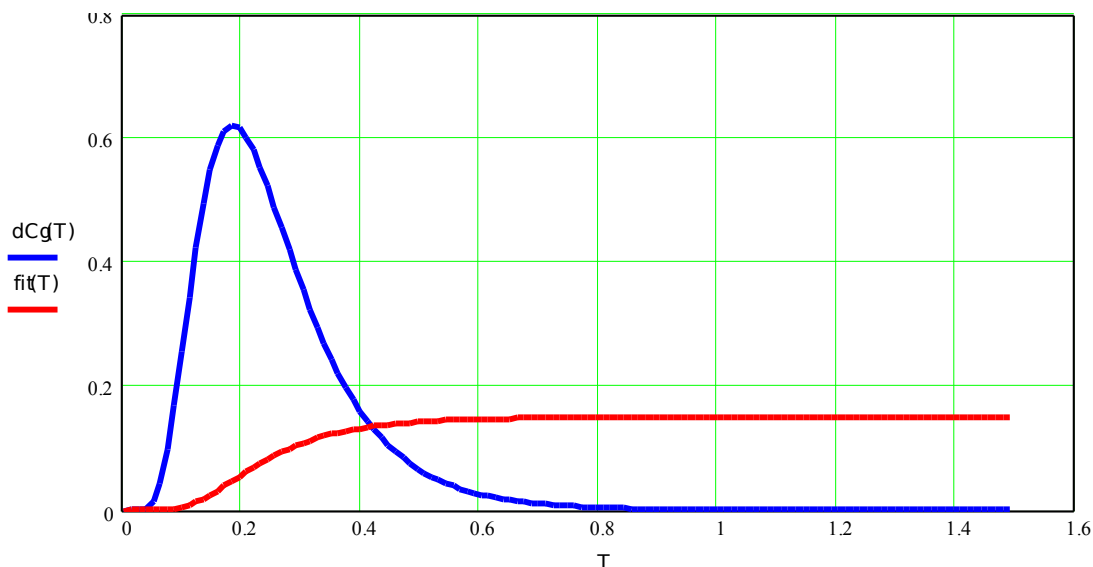


Рис. 1. Пример постпрандиального гликемического профиля (линия синего цвета) и постпрандиальной гликемической кривой (красная линия).

Как воспользоваться полученными выражениями на практике?

Для этого необходимо определить неизвестные коэффициенты в выражении (3) или (4), они одинаковы. Мы будем использовать выражение (4), которое представляет собой кривую изменения концентрации сахара в крови после приема пищи. Для получения этой кривой необходимо соблюсти ряд условий:

1. Иметь хорошо или удовлетворительно скомпенсированный диабет.
2. Максимально снизить или убрать влияние других факторов на сахар крови (инсулин короткого действия, физические нагрузки и т.п.).
3. Правильно рассчитать количество съеденной пищи, чтобы сахар не превысил почечный порог.
4. Желательно, чтобы перед измерениями сахар находился в пределах норм для здорового человека (3,3 – 5) ммоль/л.
5. Отсутствие или незначительное количество собственного инсулина.

Я провожу такие измерения обычно в выходной день утром на фоне действия базального инсулина Лантус. Натощак измеряю в течение получаса – часа сахар крови. Если он постоянен, то принимаю углеводы в количестве одной – двух хлебных единиц, в зависимости от начального уровня сахара. Далее через определенные промежутки времени провожу измерения сахара в крови при помощи глюкометра. Измерения провожу до того момента, пока произойдет стабилизация содержания сахара.

Полученную экспериментально постпрандиальную сахарную кривую использую для определения неизвестных коэффициентов a_1 , b_1 и c_1 . Предварительно из экспериментальных значений вычитается фон.

Определение коэффициентов производится при помощи аппроксимации экспериментальной кривой выражением (4) по методу наименьших квадратов. Получив значения коэффициентов a_1 , b_1 и c_1 , можно построить графики постпрандиального гликемического профиля и гликемической кривой.

На рис. 2 и рис. 3 приведены экспериментальные и аппроксимирующие гликемические кривые для 14 г. глюкозы и 33 г. сахарозы.

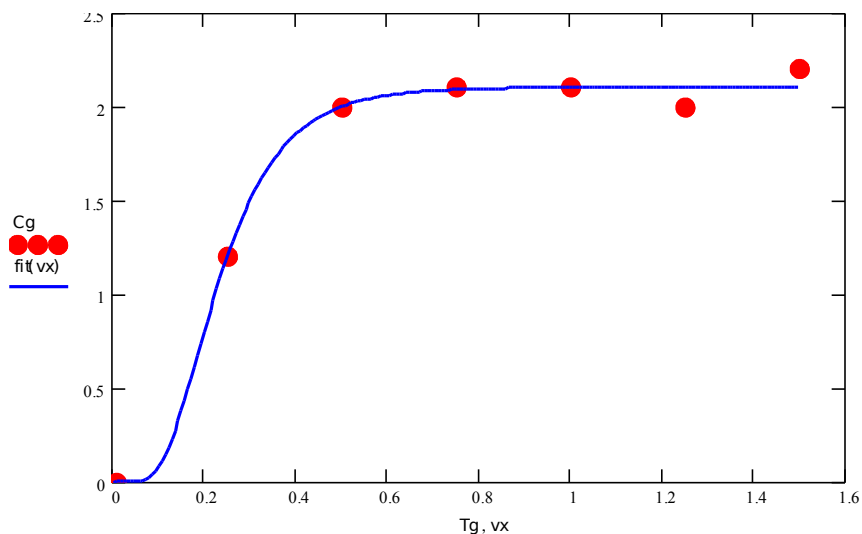


Рис. 2. Постпрандиальная гликемическая кривая глюкозы (красные точки – экспериментальные значения, синяя линия – аппроксимирующая кривая). По оси X – время, час. По оси Y – концентрация сахара в крови – ммоль/л. $a_1 = 2,55$, $b_1 = 1,511$ и $c_1 = -1,469$.

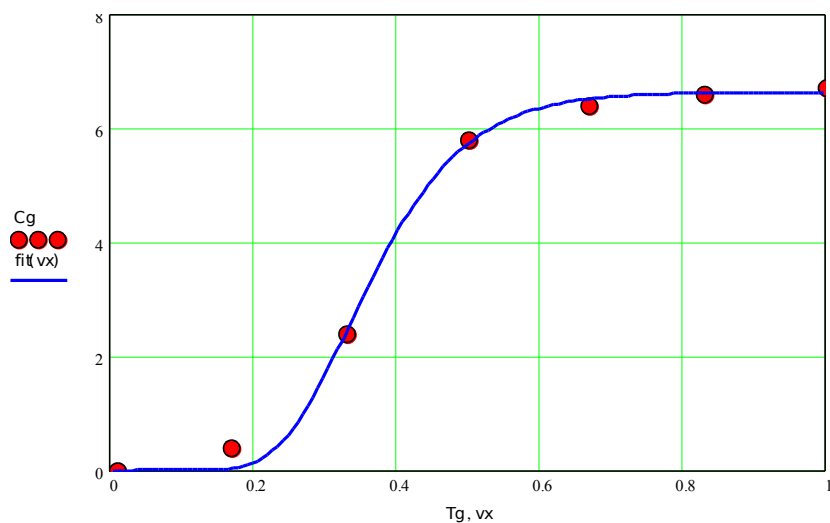


Рис. 3. Постпрандиальная гликемическая кривая сахарозы (красные точки – экспериментальные значения, синяя линия – аппроксимирующая кривая). По оси X – время, час. По оси Y – концентрация сахара в крови – ммоль/л. $a_1 = 9,13$, $b_1 = 2,442$ и $c_1 = -1,011$.

Для удобства при сравнении гликемических показателей двух продуктов глюкозы и сахарозы их профили и кривые были пересчитаны на 1 г продукта и приведены на рис. 4.

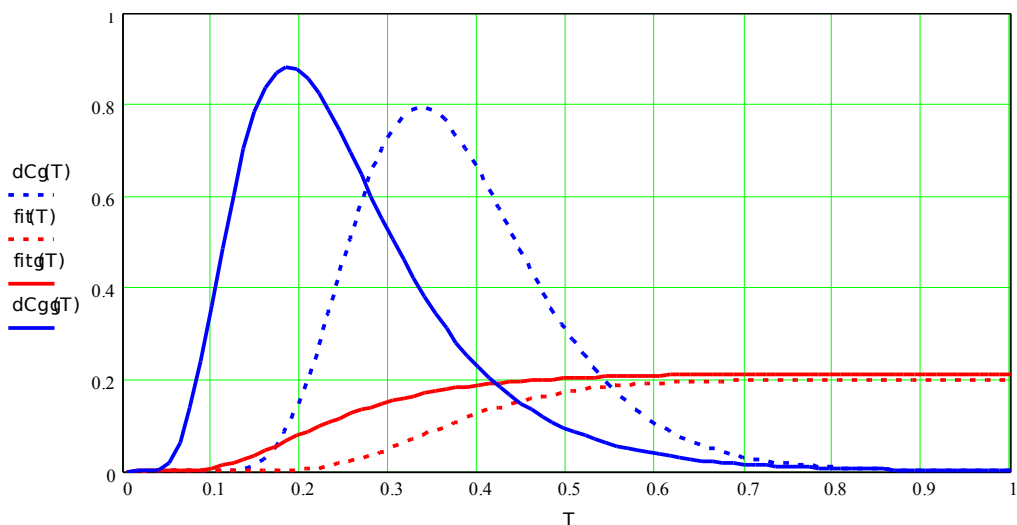


Рис. 4. Постпрандиальные гликемические профили и гликемические кривые глюкозы и сахарозы, в пересчете на 1 г. продукта. Сплошные линии для глюкозы: синяя - гликемический профиль ($a_1 = 0,182$, $b_1 = 1,511$ и $c_1 = -1,469$; время максимальной скорости повышения сахара - $t_{\max} = 11$ мин; максимальная скорость повышения сахара - $-\frac{d}{dt}C1|_{t_{\max}} = 0,882 \frac{\text{ммоль}}{\text{л}} / \text{час}$), красная – гликемическая кривая (максимальное значение сахара в крови, которое дает 1 г продукта - $C1_{\max} = 0,213 \frac{\text{ммоль}}{\text{л}}$); пунктирные линии для сахарозы: синяя – гликемический профиль ($a_1 = 0,277$, $b_1 = 2,442$ и $c_1 = -1,011$; $t_{\max} = 21$ мин; $\frac{d}{dt}C1|_{t_{\max}} = 0,793 \frac{\text{ммоль}}{\text{л}} / \text{час}$), красная – гликемическая кривая ($C1_{\max} = 0,201 \frac{\text{ммоль}}{\text{л}}$). По оси X – время, час. По оси Y – концентрация сахара в крови – ммоль/л для гликемической кривой и скорость изменения концентрации сахара ммоль/л/час для гликемического профиля.

Анализ гликемических профилей, приведенных на рис. 4, показывает, что для продуктов можно использовать новое определение **гликемического индекса (ГИ)**, который характеризуется двумя показателями:

- 1) Высота пика гликемического профиля (максимальная скорость повышения сахара).
- 2) Положение пика на временной оси (время максимальной скорости повышения сахара).

Если высоту пика для глюкозы взять за 100, то для сахарозы получим 90; положение пика во времени для глюкозы – 1, то для сахарозы – 1,8.

В дальнейшем предполагается исследование гликемических характеристик рафинированных углеводов: фруктозы, крахмала. Затем на очереди сложносоставные продукты.

3. Моделирование гликемического профиля и гликемической кривой ультракоротких и коротких инсулинов

Моделирование воздействия инсулинов ультракороткого и короткого срока

действия на концентрацию сахара в крови проведем с использованием уже выше упоминавшихся выражений. Выражение (3) в виде

$$\frac{d}{dt} C2_1(t) = f2_1(t) = \frac{a_2 \cdot \exp\{-[b_2 \cdot (\ln(t) - c_2)]^2\}}{t} \quad (5)$$

используем для описания гликемического профиля, а выражение (4) в виде

$$\begin{aligned} C2_1(t_k) &= \int_{t_0}^{t_k} f2_1(t) dt = \int_{t_0}^{t_k} \frac{a_2 \cdot \exp\{-[b_2 \cdot (\ln(t) - c_2)]^2\}}{t} dt = \\ &= a_2 \cdot \sqrt{\pi} \cdot \frac{\operatorname{erf}\{b_2 \cdot [\ln(t_k) - c_2]\} + \operatorname{erf}\{b_2 \cdot [c_2 - \ln(t_0)]\}}{2 \cdot b_2} \end{aligned} \quad (6)$$

для описания гликемической кривой.

Экспериментальное определение гликемических характеристик инсулинов проводится в соответствии с требованиями, изложенными в разделе 2. Зная начальный уровень сахара в крови, а также дифференциальные и интегральные характеристики глюкозы подбираем необходимое ее количество, чтобы не превысить почечный порог и принимаем во внутрь. Приблизительно через час или немного меньше начинаем измерения сахара в крови. Убедившись, что уровень сахара стабилизировался, делаем инъекцию инсулина, предварительно рассчитав по программе Юрия Кадомского дозу, необходимую для утилизации принятого количества глюкозы. С этого момента начинается отсчет времени. Через определенные промежутки времени проводим измерения уровня сахара в крови. Во время проведения эксперимента нельзя принимать пищу и увеличивать физические нагрузки.

После выхода значений сахара на стабильный уровень эксперимент прекращаем. Полученная экспериментальная кривая является основой для расчета неизвестных коэффициентов.

Определение коэффициентов производится при помощи аппроксимации экспериментальной кривой выражением (6) по методу наименьших квадратов. Предварительно из экспериментальных значений вычитается фон (уровень сахара в крови, когда сделали инъекцию инсулина). Получив значения коэффициентов a_2 , b_2 и c_2 , строим графики гликемического профиля и гликемической кривой инсулина.

На рис. 5 приведена экспериментальная гликемическая кривая инсулина Хумалог в количестве 8 единиц и ее аппроксимация с помощью выражения (6). Вычисленные значения $a_2 = -5,098$, $b_2 = 1,049$ и $c_2 = 0,455$.

Для удобства пользования полученными результатами гликемический профиль и кривая пересчитаны на 1 единицу инсулина ($a_2 = -0,637$, $b_2 = 1,049$ и $c_2 = 0,455$; $t_{\max} = 60$ мин; $\left. \frac{d}{dt} C2 \right|_{t_{\max}} = -0,508 \frac{\text{ммоль}}{\text{л}} / \text{час}$; $C2_{\max} = -1,08 \frac{\text{ммоль}}{\text{л}}$). Результаты приведены на рис. 6.

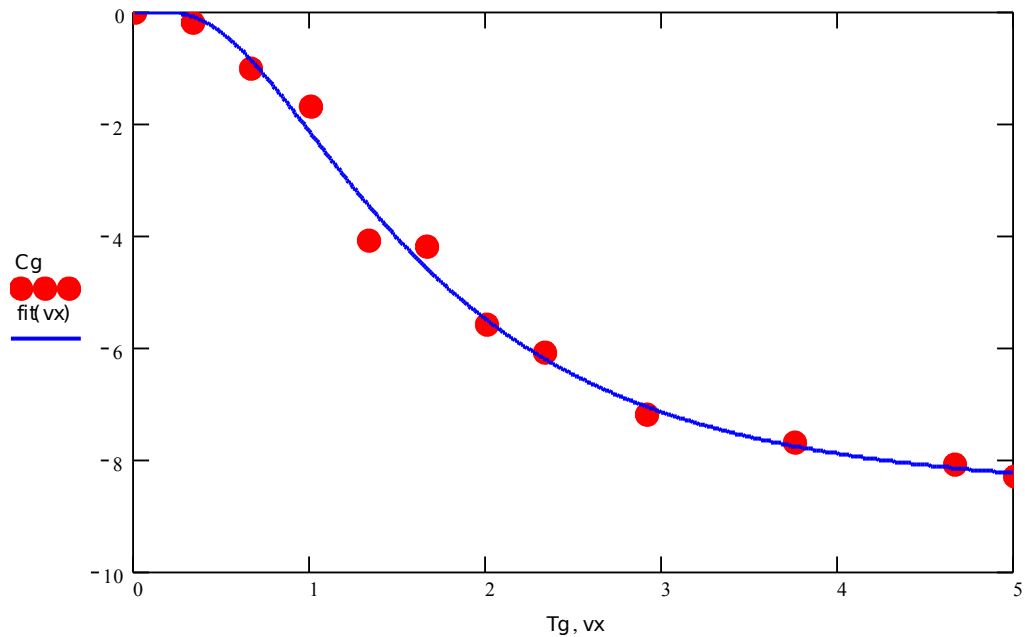


Рис. 5. Гликемическая кривая действия 8 единиц инсулина Хумалог (красные точки – экспериментальные значения, синяя линия – аппроксимирующая кривая. По оси X – время, час. По оси Y – концентрация сахара в крови – ммоль/л.

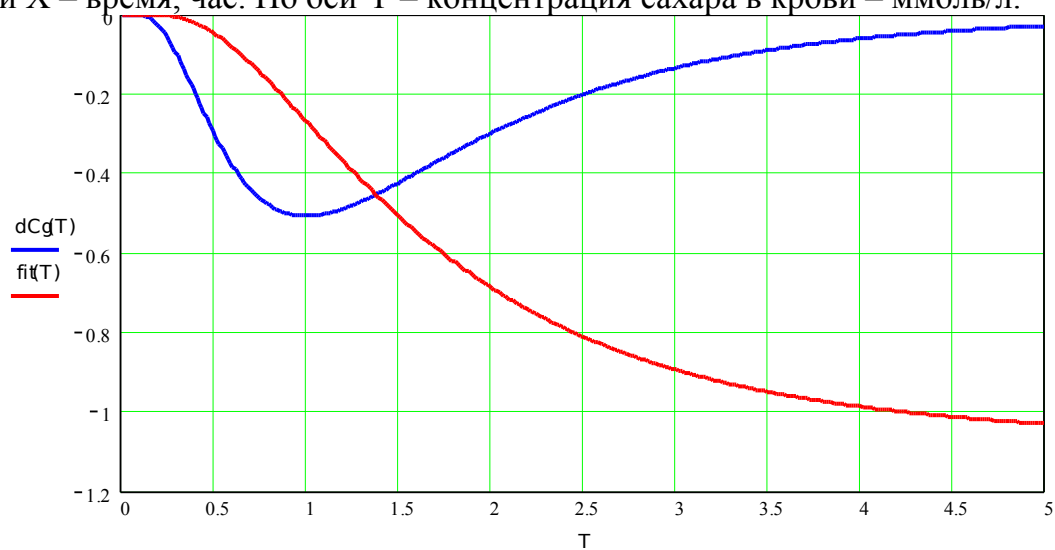


Рис. 6. Гликемический профиль (синяя линия) и гликемическая кривая (красная линия) 1 единицы инсулина Хумалог. По оси X – время, час. По оси Y – концентрация сахара в крови – ммоль/л для кривой и ммоль/л/час для профиля.

Спустя две недели был проведен повторный эксперимент по определению характеристик гликемической кривой и гликемического профиля инсулина Хумалог. Результаты эксперимента с действием 6 единиц инсулина приведены на рис. 7. Вычисленные значения $a_2 = -3,818$, $b_2 = 0,994$ и $c_2 = 0,67$.

Для действия 1 единицы инсулина получены следующие значения коэффициентов ($a_2 = -0,636$, $b_2 = 0,994$ и $c_2 = 0,67$; $t_{\max} = 71$ мин; $\frac{d}{dt} C2|_{t_{\max}} = -0,42 \frac{\text{ммоль}}{\text{л}} / \text{час}$; $C2_{\max} = -1,14 \frac{\text{ммоль}}{\text{л}}$). Результаты приведены на рис. 8.

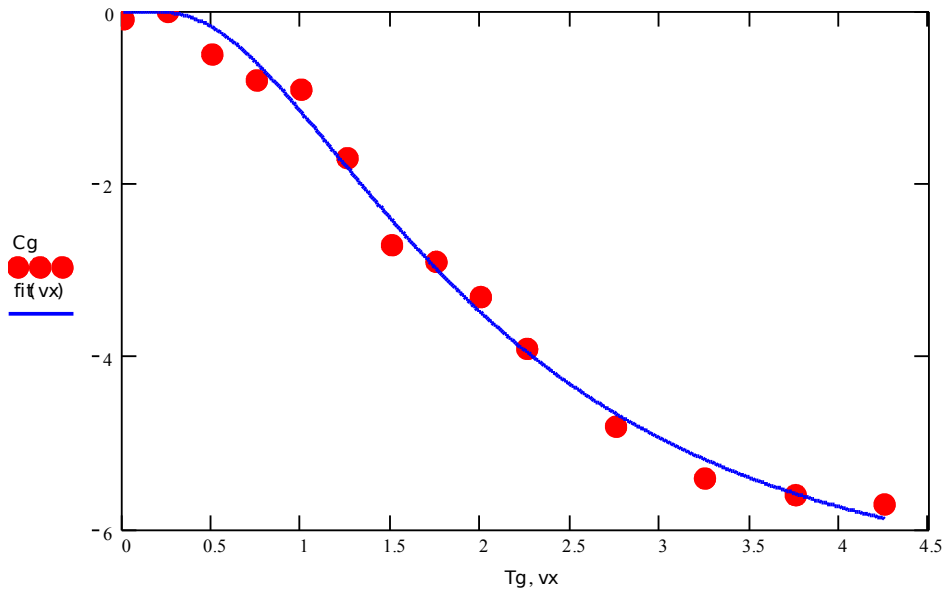


Рис. 7. Гликемическая кривая действия 6 единиц инсулина Хумалог (красные точки – экспериментальные значения, синяя линия – аппроксимирующая кривая. По оси X – время, час. По оси Y – концентрация сахара в крови – ммоль/л.

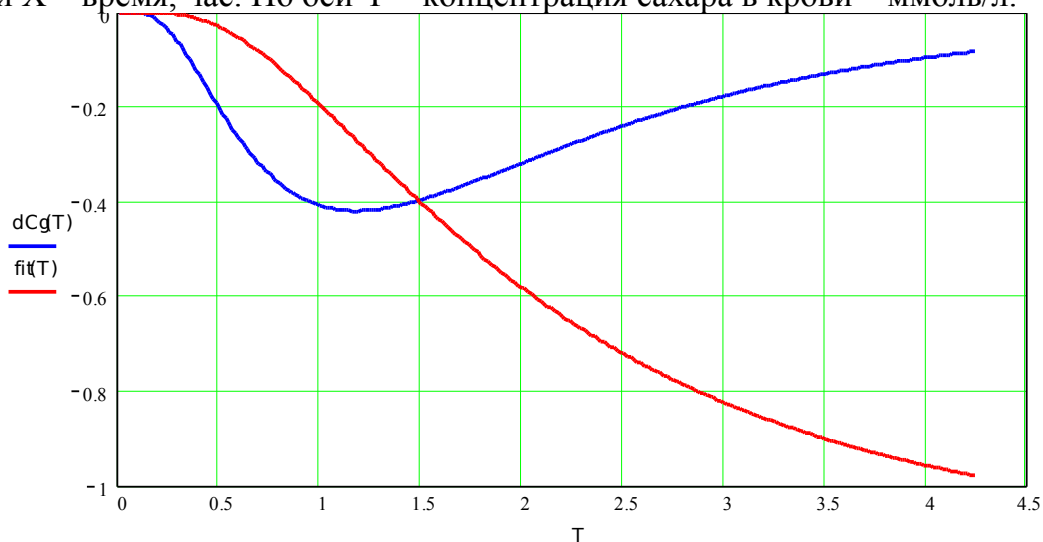


Рис. 8. Гликемический профиль (синяя линия) и гликемическая кривая (красная линия) 1 единицы инсулина Хумалог. По оси X – время, час. По оси Y – концентрация сахара в крови – ммоль/л для кривой и ммоль/л/час для профиля.

Сравнение результатов двух экспериментов для действия 1 единицы инсулина приведены на рис. 9 и 10. Из рисунков видно, что совпадение результатов удовлетворительное. Это позволило провести расчет средних значений коэффициентов для гликемической кривой и гликемического профиля. ($a_2 = -0,64$, $b_2 = 1,02$ и $c_2 = 0,56$; $t_{\max} = 66$ мин; $\frac{d}{dt} C2|_{t_{\max}} = -0,46 \frac{\text{ммоль}}{\text{л}} / \text{час}$; $C2_{\max} = -1,1 \frac{\text{ммоль}}{\text{л}}$).

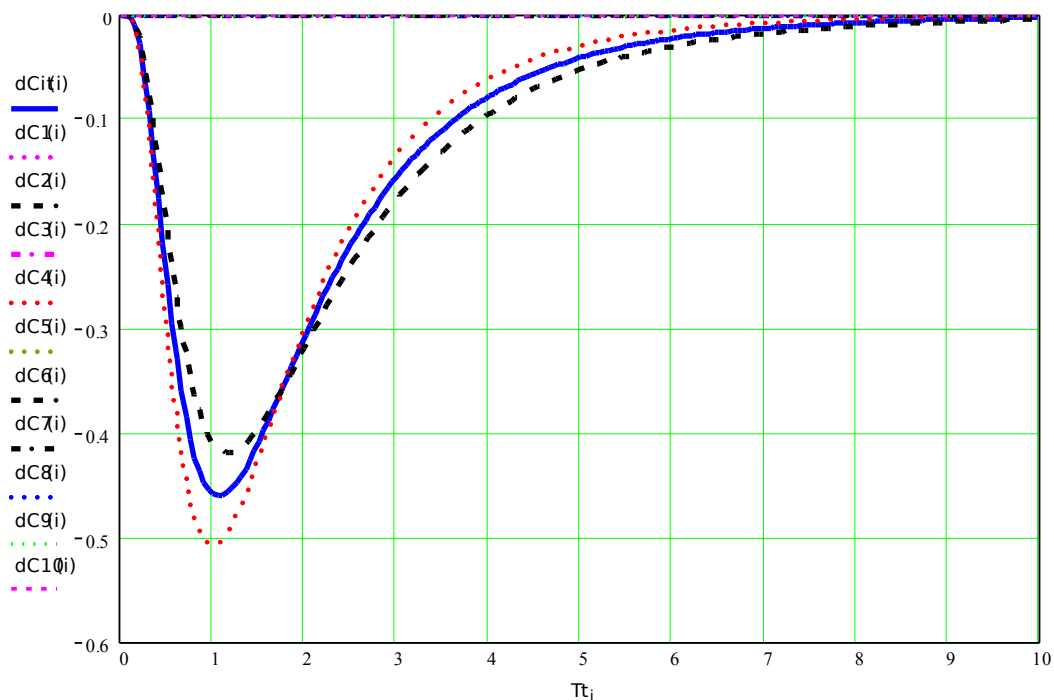


Рис. 9. Гликемический профиль действия 1 единицы инсулина Хумалог (красный пунктир для 8 ед., черный пунктир – для 6 ед., синяя линия – среднее значение). По оси X – время, час. По оси Y – скорость утилизации сахара ммоль/л/час.

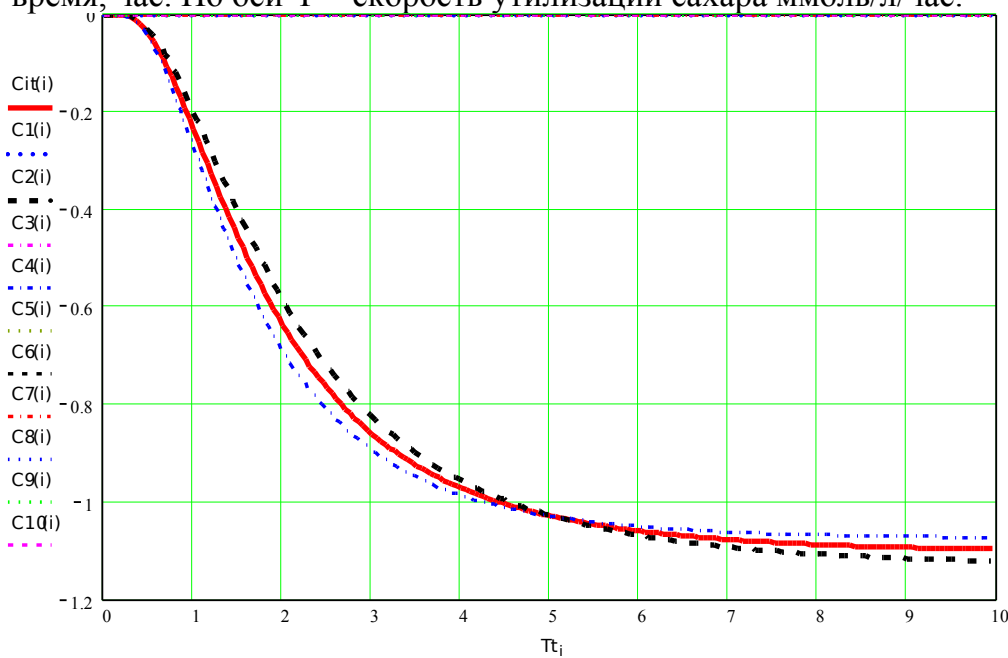


Рис. 10. Гликемическая кривая действия 1 единицы инсулина Хумалог (синий пунктир для 8 ед., черный пунктир – для 6 ед., красная линия – среднее значение). По оси X – время, час. По оси Y – концентрация сахара в крови ммоль/л.

4. Моделирование гликемического профиля и гликемической кривой инсулина Лантус

Для моделирования гликемических кривых беспикового инсулина длительного действия Лантус выражения (5) и (6), указанные в разделе 3 не подходят.

Смоделируем действие этого инсулина следующим образом. Для гликемического профиля используем выражение вида:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} C_{2_2}(t) = f_{2_2}(t) &= a_2 \cdot t, \quad t_0 < t < t_1 \\ &= b_2, \quad t_1 \leq t < t_2 \\ &= b_2 - c_2 \cdot t, \quad t_2 \leq t \leq t_3 \end{aligned} \quad (7)$$

Тогда для гликемической кривой после интегрирования выражения (7) получим:

$$\begin{aligned} \tilde{N}_{2_2}(t) &= \frac{a_2 \cdot (t^2 - t_0^2)}{2}, \quad t_0 < t < t_1 \\ &= \frac{a_2 \cdot (t_1^2 - t_0^2)}{2} + b_2 \cdot (t - t_1), \quad t_1 \leq t < t_2 \\ &= \frac{a_2 \cdot (t_1^2 - t_0^2)}{2} + b_2 \cdot (t_2 - t_1) + \frac{c_2 \cdot ((t - t_3)^2 - (t_2 - t_3)^2)}{2}, \quad t_2 \leq t \leq t_3 \\ &= \frac{a_2 \cdot (t_1^2 - t_0^2)}{2} + b_2 \cdot (t_2 - t_1) + \frac{c_2 \cdot (-(t_2 - t_3)^2)}{2}, \quad t > t_3 \end{aligned} \quad (8)$$

где t_0 - момент инъекции инсулина, t_1 - время выхода действия инсулина на стационарный уровень, t_2 - время окончания стационарного уровня, t_3 - время окончания действия инсулина, a_2 , b_2 и c_2 неизвестные коэффициенты.

Графическое представление такой модели можно увидеть на рис. 11.

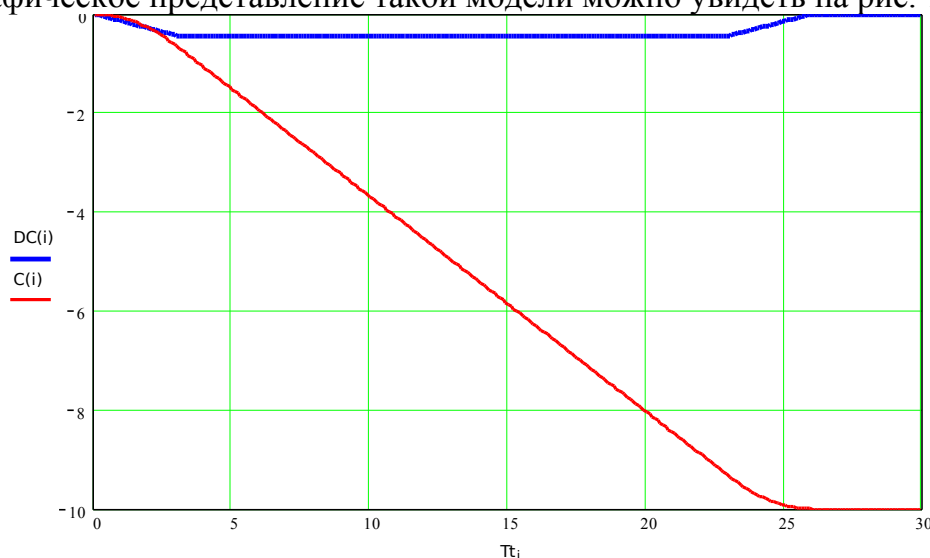


Рис. 11. Модель гликемического профиля (синяя линия) и гликемической кривой (красная линия) беспикового инсулина длительного действия Лантус.

Для получения значений коэффициентов необходимо проведение измерений уровня сахара, как для начального участка, так и при выходе на стационарный уровень. Из начального участка после аппроксимации экспериментальной кривой выражением вида $\frac{a_2 \cdot t^2}{2}$, находим значение коэффициента a_2 . Стационарный участок используем для вычисления коэффициента b_2 , после аппроксимации экспериментальной зависимости выражением вида $b_2 \cdot t$. Концевой участок экспериментальной гликемической кривой используем для нахождения значения

коэффициента c_2 , после аппроксимации ее выражением вида $\frac{c_2 \cdot t^2}{2}$. За один раз измерения провести не удастся. Поэтому необходимо проведение трех экспериментов и их совместная обработка.

Эксперименты по исследованию влияния инсулина Лантус мною пока не проводились.

6. Моделирование влияния других факторов на гликемическую кривую

С учетом вышеизложенного подхода, видимо, можно подобрать соответствующие условия для проведения эксперимента по измерению гликемической кривой при действии только одного фактора, когда влияние других либо сведено к минимуму, либо устранено. Такими факторами я считаю влияние почечного порога, физической нагрузки, алкоголя и т.п.

Вид зависимостей, которым подчиняется сахар крови при действии таких факторов мне пока неизвестен, так как эксперименты не проводил.

7. Моделирование гликемического профиля и гликемической кривой

После того, как стало понятны приемы, с помощью которых можно получить индивидуальные количественные характеристики для основных процессов, влияющих на гликемическую кривую больного ИЗСД, появилась возможность учитывать их при моделировании.

Моделирование результатов действия всех факторов на гликемический профиль и гликемическую кривую проводится в соответствии с уравнениями (1) и (2).

На рис. 12 и 13 представлены результаты моделирования процесса изменения гликемических показателей при однократном приеме пищи и однократной компенсационной дозе инсулина. Характеристики инсулина – мои индивидуальные для Хумалога. Характеристики пищи – модельные, так как мне пока неизвестны характеристики многих продуктов. Прием пищи и инъекция инсулина проведены одновременно. Из рисунков видно, что из-за несовпадения пиков гликемических профилей на гликемической кривой появляется провал, вызванный несоответствием скорости поступления сахара в кровь за счет пищи и скорости его утилизации за счет инсулина. Такой провал в гликемической кривой может вызвать приступ гипогликемии у больного. Это я неоднократно наблюдал на себе. Совмещение по времени пиков на гликемических профилях дают более плавную гликемическую кривую, рис. 14 и 15.

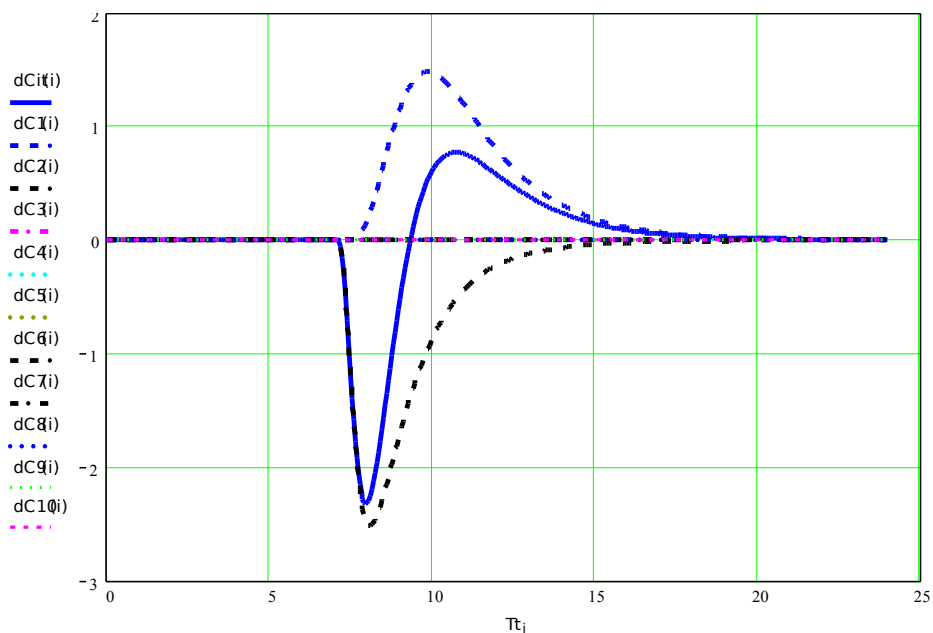


Рис. 12. Гликемический профиль (синяя линия) при однократном приеме пищи (синяя пунктирная линия) и однократной компенсационной дозе (черная пунктирная линия). Прием пищи и инъекция проведены одновременно. По оси X – время, час. По оси Y – скорость изменения сахара ммоль/л/час.

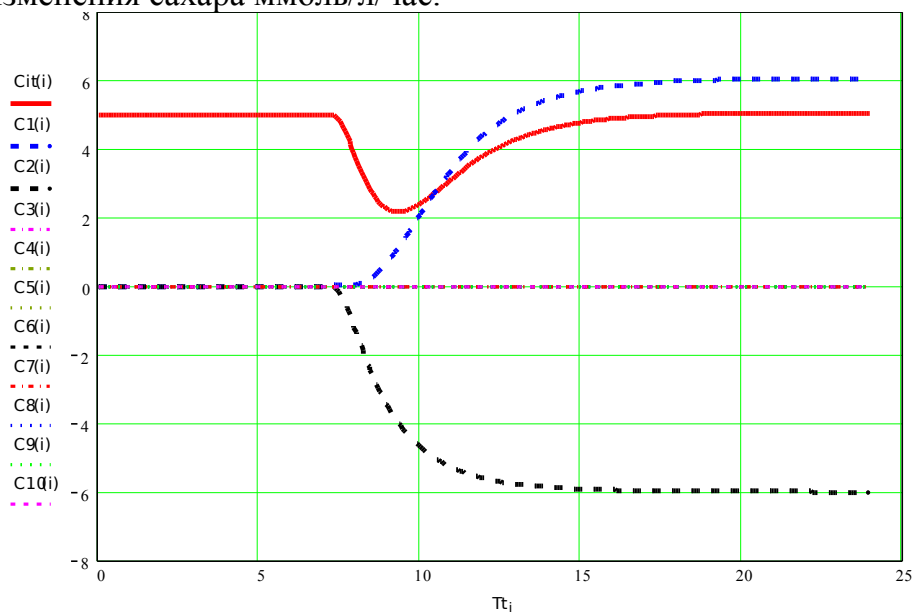


Рис. 12. Гликемическая кривая (красная линия) при однократном приеме пищи (синяя пунктирная линия) и однократной компенсационной дозе (черная пунктирная линия). Прием пищи и инъекция проведены одновременно. По оси X – время, час. По оси Y – содержание сахара ммоль/л.

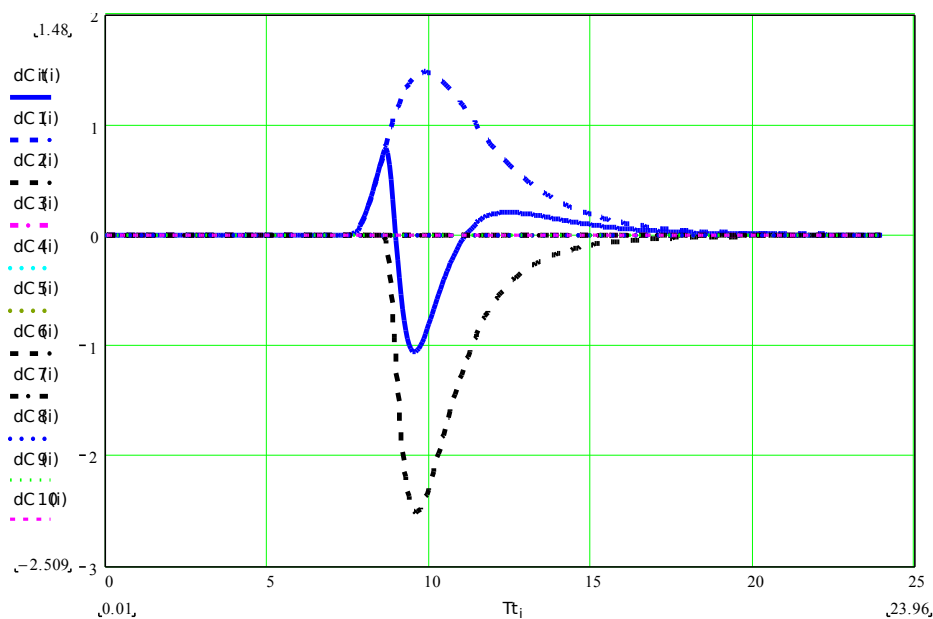


Рис. 13. Гликемический профиль (синяя линия) при однократном приеме пищи (синяя пунктирная линия) и однократной компенсационной дозе (черная пунктирная линия). Пики гликемических профилей совмещены по времени. По оси X – время, час. По оси Y – скорость изменения сахара ммоль/л/час.

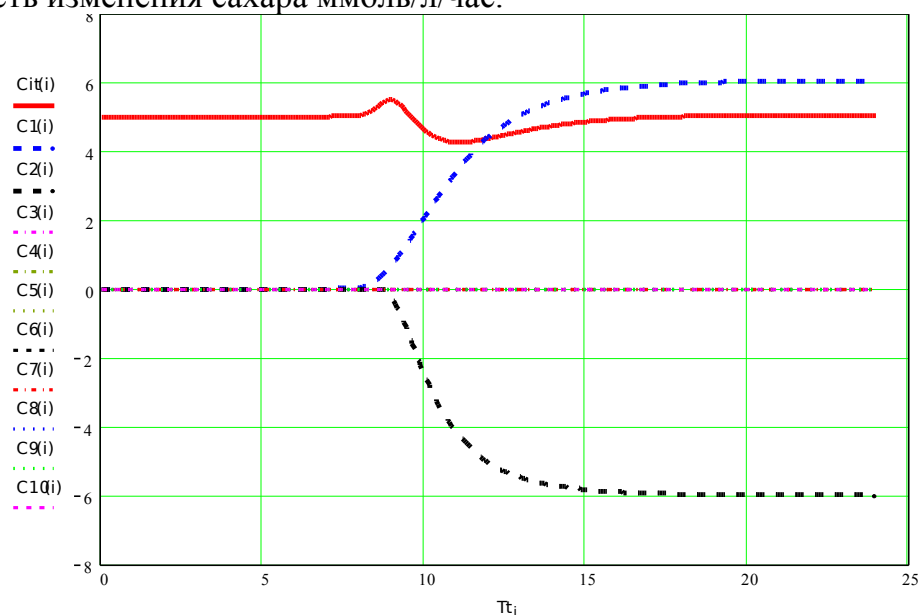


Рис. 14. Гликемическая кривая (красная линия) при однократном приеме пищи (синяя пунктирная линия) и однократной компенсационной дозе (черная пунктирная линия). Пики гликемических профилей совмещены по времени. По оси X – время, час. По оси Y – содержание сахара ммоль/л.

На рис. 15 и 16 показаны результаты моделирования многократного (пятикратного) приема пищи и многократных (пятикратных) инъекций ультракороткого инсулина, причем ни все приемы пищи скомпенсированы инсулином. Видно, что и гликемический профиль больного, и его гликемическая кривая в течении суток претерпевают значительные колебания. И это при учете только двух факторов. В действительности эти колебания могут быть либо более сглаженными – при точном учете влияния каждого фактора, либо колебания с большей амплитудой, когда учет факторов проводится слабо или совсем не

проводится.

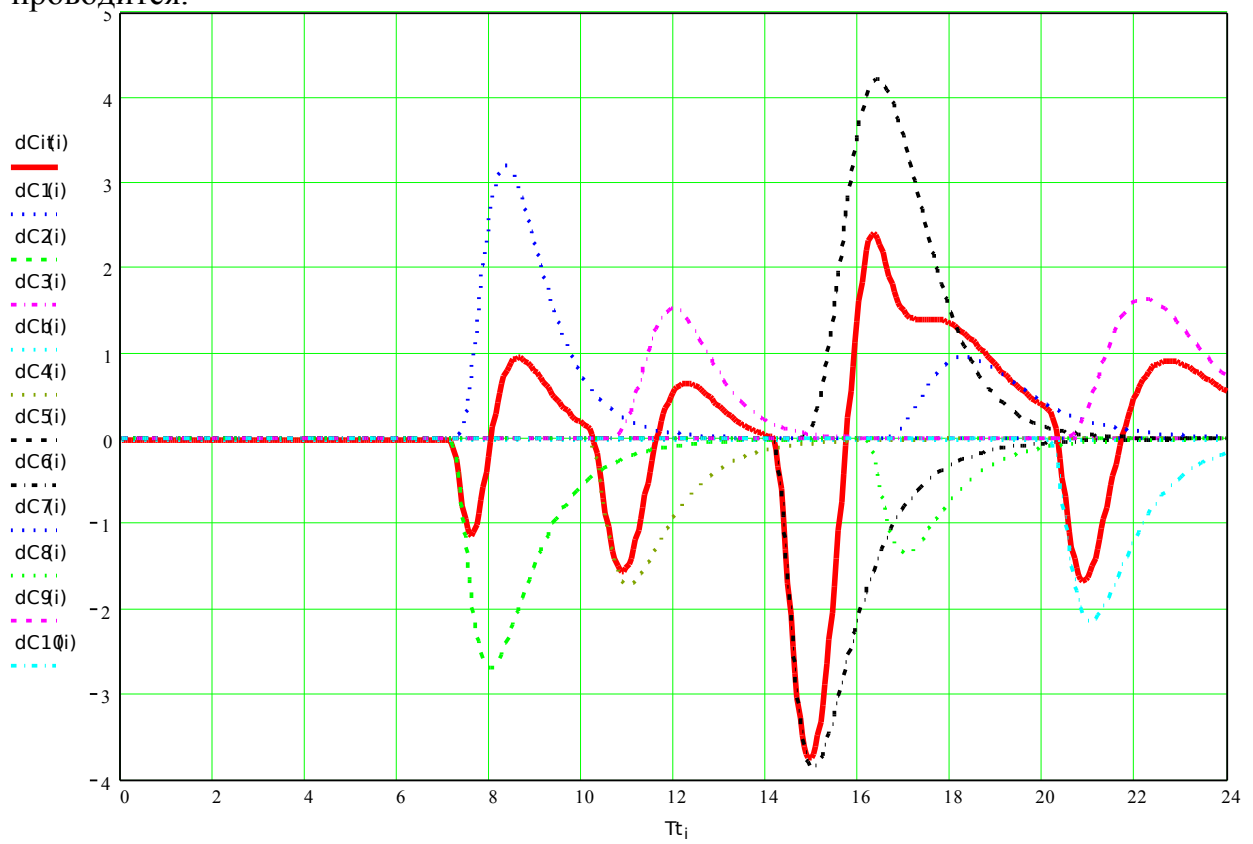


Рис. 15. Гликемический профиль (красная линия) при многократном приеме пищи и многократных инъекциях инсулина. По оси X – время, час. По оси Y – скорость изменения сахара ммоль/л/час.

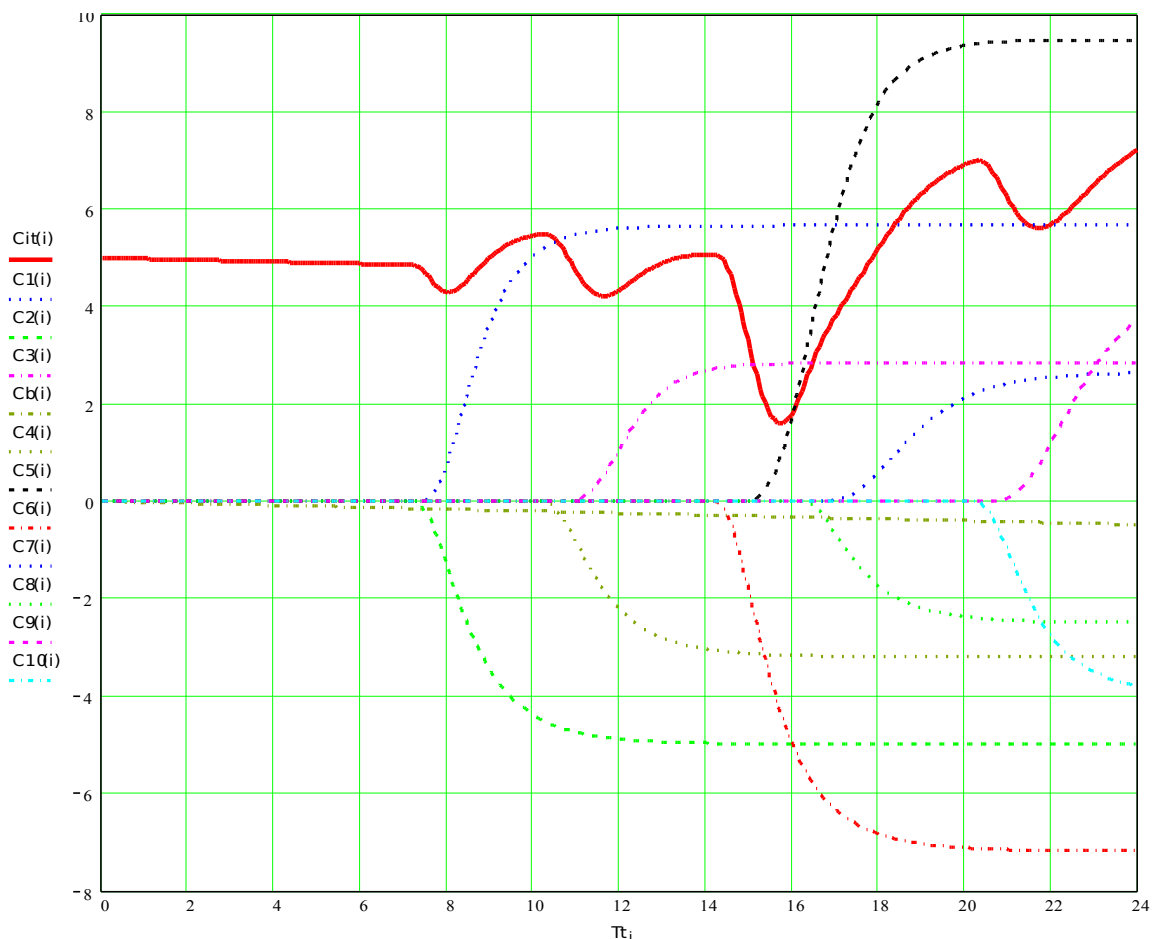


Рис. 16. Гликемическая кривая (красная линия) при многократном приеме пищи многократных инъекциях инсулина. По оси X – время, час. По оси Y – содержание сахара ммоль/л.

Заключение

Представленные здесь результаты являются предварительными. Процесс их пополнения и обработки продолжается. Но тем не менее, я счел необходимым поделиться ими с аудиторией форума Диа-Клуба, в надежде на конструктивное и заинтересованное обсуждение.

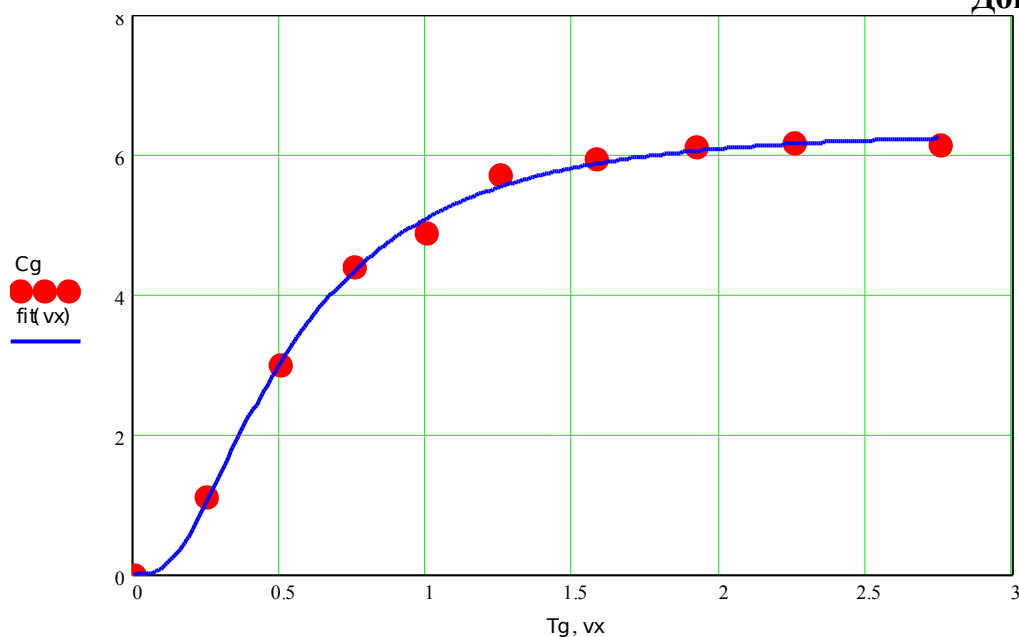


Рис. 16. Постпрандиальная гликемическая кривая 31 г. фруктозы (красные точки – экспериментальные значения, синяя линия – аппроксимирующая кривая). По оси X – время, час. По оси Y – концентрация сахара в крови – ммоль/л. $a_1=3,329$, $b_1=0,934$ и $c_1=-0,652$.

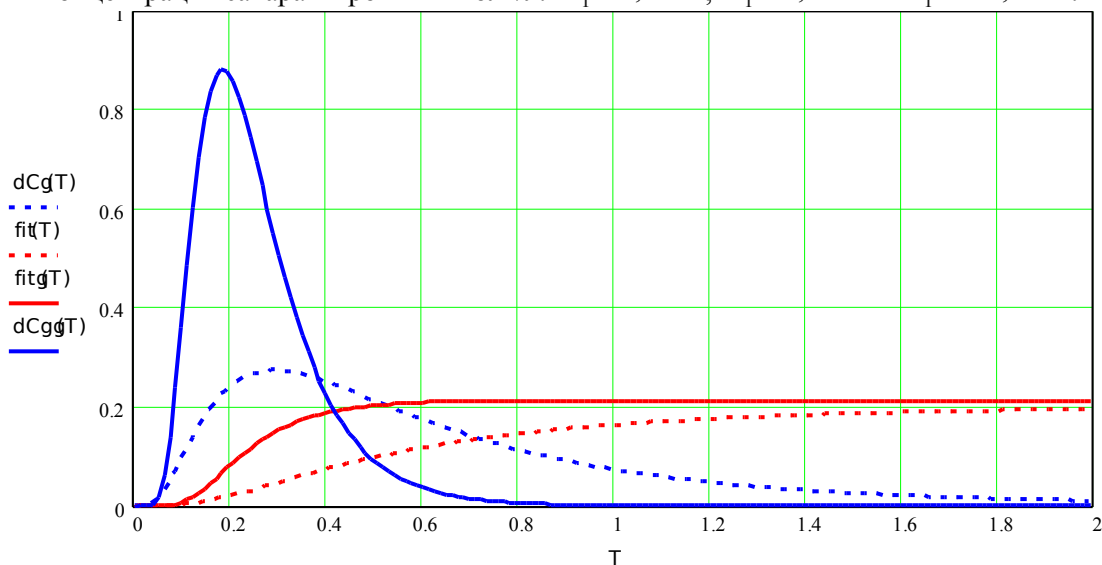
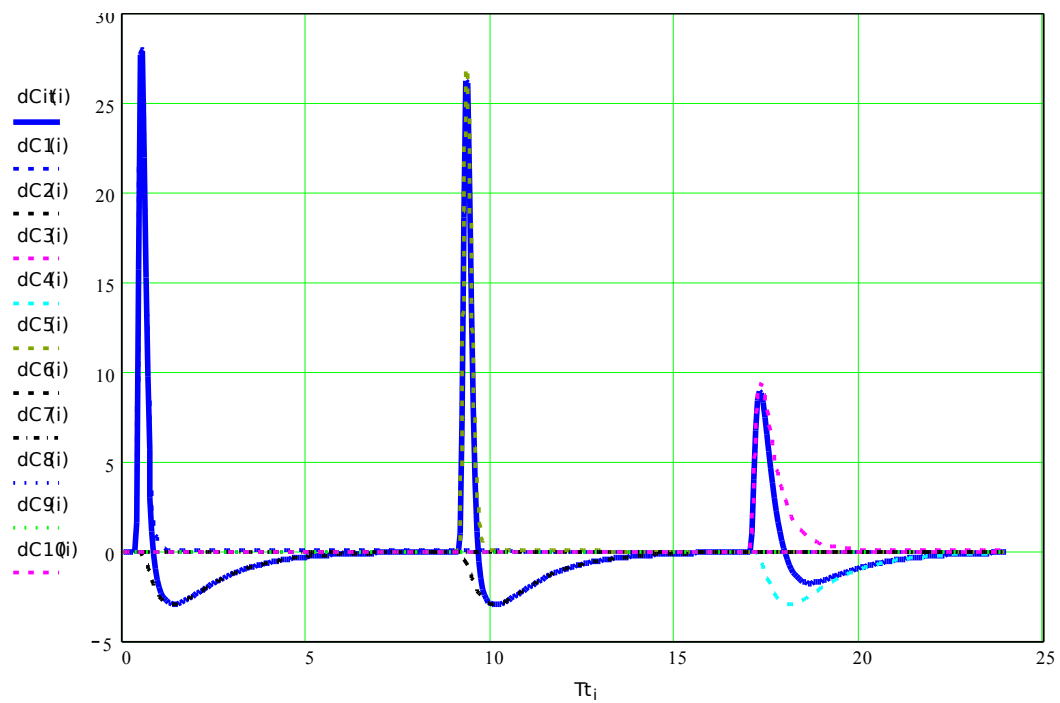
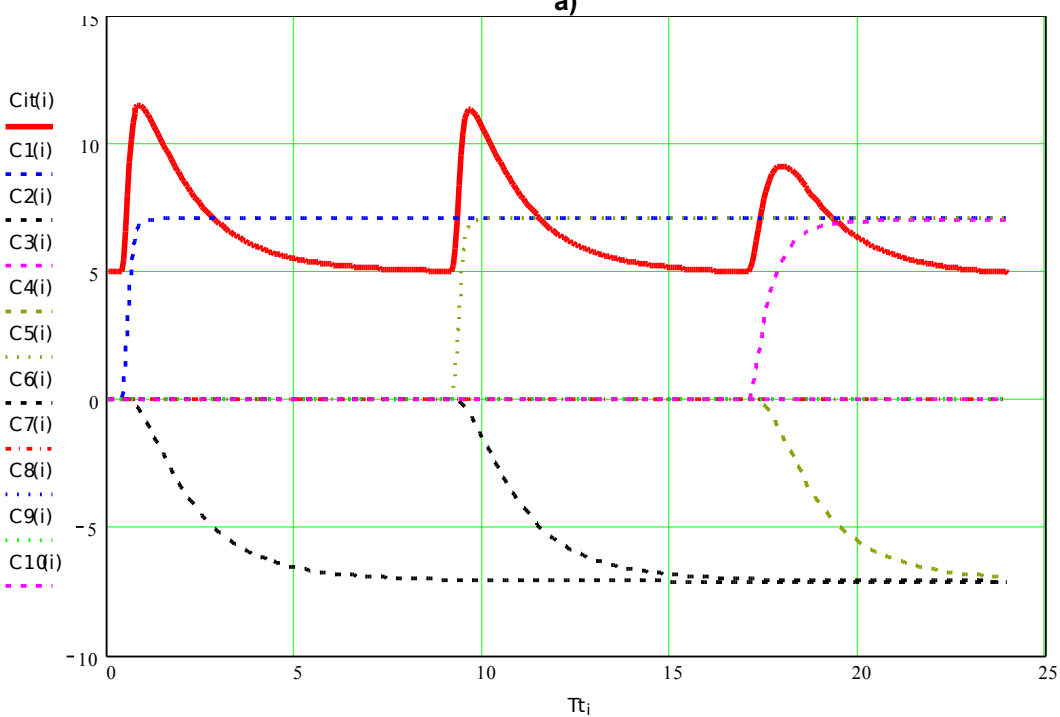


Рис. 17. Постпрандиальные гликемические профили и гликемические кривые глюкозы и фруктозы, в пересчете на 1 г. продукта. Сплошные линии для глюкозы: синяя - гликемический профиль, красная – гликемическая кривая; пунктирные линии для фруктозы: синяя – гликемический профиль ($a_1=0,107$, $b_1=0,934$ и $c_1=-0,652$; $t_{max}=18$ мин; $\frac{d}{dt}CI|_{t_{max}}=0,275 \frac{\text{ммоль}}{\text{л}} / \text{час}$), красная – гликемическая кривая ($CI_{max}=0,204 \frac{\text{ммоль}}{\text{л}}$). По оси X – время, час. По оси Y – концентрация сахара в крови – ммоль/л для гликемической кривой и скорость изменения концентрации сахара ммоль/л/час для гликемического профиля.

Если высоту пика для глюкозы взять за 100, то для фруктозы получим 31; положение пика во времени для глюкозы – 1, то для сахарозы – 1,6.

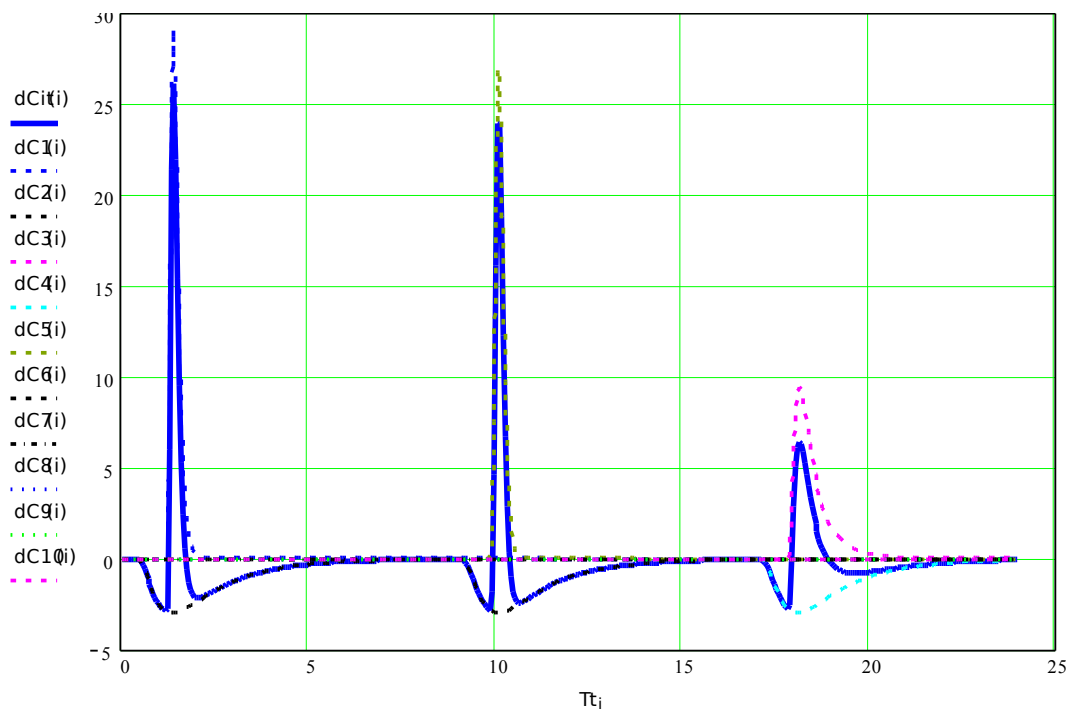


а)

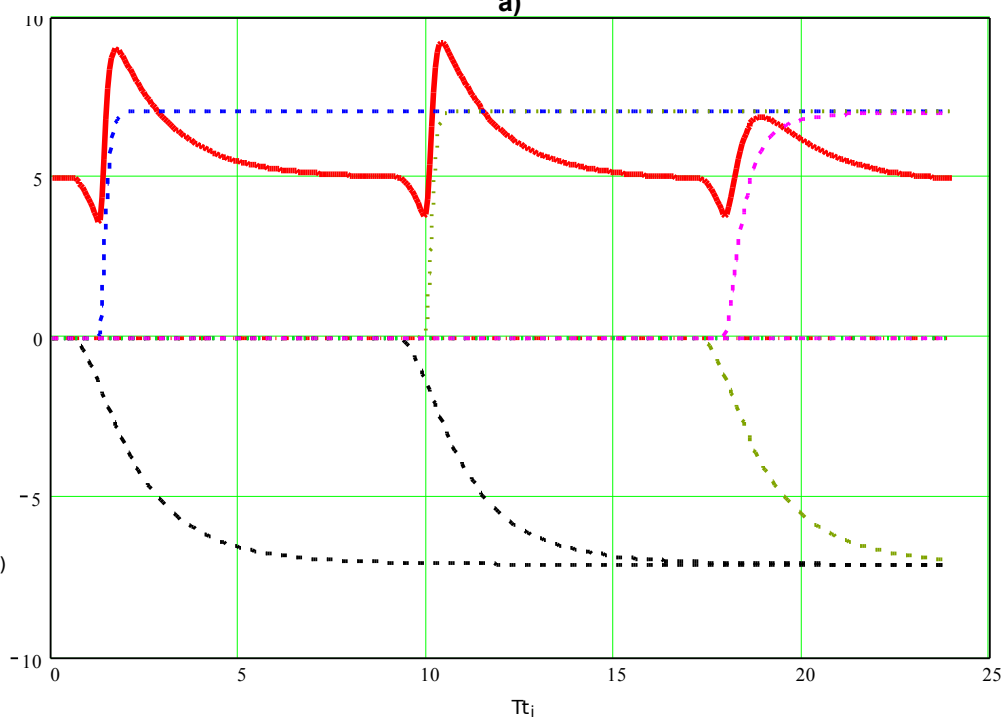


б)

Рис. 18. **а)** Гликемический профиль (синяя линия) и **б)** гликемическая кривая (красная линия) при трехкратном приеме пищи (первый прием – глюкоза, второй прием – сахароза, третий – фруктоза) и трехразовой компенсации. Инъекции инсулина Хумалог и приемы пищи совмещены по времени. По оси X – время, час. По оси Y – скорость изменения сахара ммоль/л/час для гликемического профиля и содержание сахара ммоль/л для гликемической кривой.



а)



б)

Рис. 19. а) Гликемический профиль (синяя линия) и б) гликемическая кривая (красная линия) при трехкратном приеме пищи (первый прием – глюкоза, второй прием – сахароза, третий – фруктоза) и трехразовой компенсации. Пики действия инсулина Хумалог и приемы пищи совмещены по времени. По оси Y – скорость изменения сахара ммоль/л/час для гликемического профиля и содержание сахара ммоль/л для гликемической кривой.

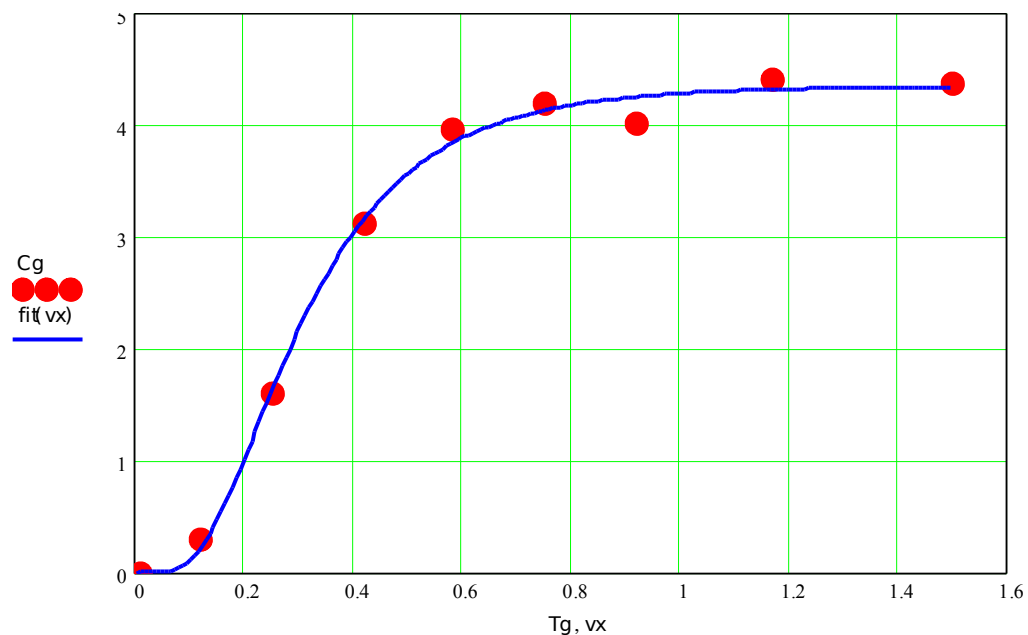


Рис. 20. Постпрандиальная гликемическая кривая 27 г. картофельного крахмала (21,1 г. углеводов) (красные точки – экспериментальные значения, синяя линия – аппроксимирующая кривая). По оси X – время, час. По оси Y – концентрация сахара в крови – ммоль/л. $a_1=3,103$, $b_1=1,266$ и $c_1=-1,205$.

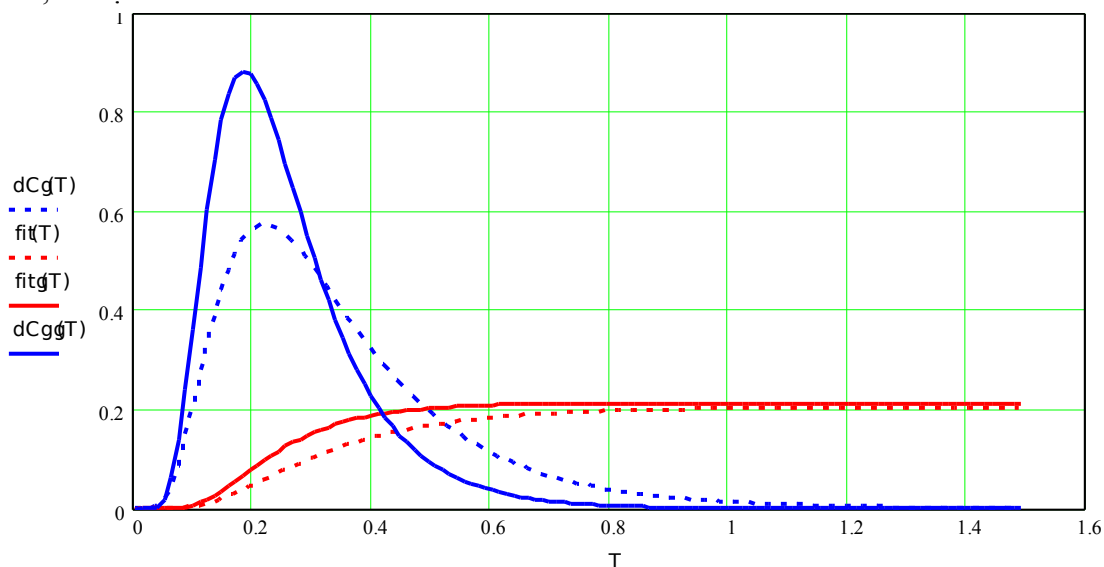


Рис. 21. Постпрандиальные гликемические профили и гликемические кривые глюкозы и картофельного крахмала, в пересчете на 1 г. углеводов. Сплошные линии для глюкозы: синяя – гликемический профиль, красная – гликемическая кривая; пунктирные линии для крахмала: синяя – гликемический профиль ($a_1=0,147$, $b_1=1,266$ и $c_1=-1,205$; $t_{\max}=13$ мин; $\frac{d}{dt}CI|_{t_{\max}}=0,574 \frac{\text{ммоль}}{\text{л}}/\text{час}$), красная – гликемическая кривая ($CI_{\max}=0,206 \frac{\text{ммоль}}{\text{л}}$). По оси X – время, час. По оси Y – концентрация сахара в крови – ммоль/л для гликемической кривой и скорость изменения концентрации сахара ммоль/л/час для гликемического профиля.

Если высоту пика для глюкозы взять за 100, то для крахмала получим 64; положение пика во времени для глюкозы – 1, то для крахмала – 1,2.